

徐重新, 张江兆, 胡晓丹, 等. 农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 8–15.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.04.002

农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究进展

徐重新^{1,2}, 张江兆^{1,3}, 胡晓丹¹, 林曼曼¹, 陈蔚¹, 张霄¹, 刘媛^{1,2}, 刘贤金^{1,2}

(1. 江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所/省部共建国家重点实验室培育基地—江苏省食品质量安全重点实验室, 江苏南京 210014;

2. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013; 3. 南京农业大学植物保护学院, 江苏南京 210095)

摘要:病虫害严重威胁了农作物生长发育及农产品质量安全。农药是病虫害防治的关键, 但长期滥用不仅加速了病虫害的抗药性, 也给生态环境造成极大污染, 合理用药是农业可持续发展的必然要求。农药联合复配是提升现有农药对靶标病虫害防治效率的最直接方式, 同时通过复配可以减少药用量, 也能提高农产品质量安全水平、延缓病虫害抗药性以及减少环境污染。农药联合复配是农药合理优化利用研究的热点。本文按化学—化学农药复配、生物—生物农药复配和生物—化学农药复配 3 种常规形式进行汇总归类, 系统梳理近年国内外有关这 3 种形式的农药联合复配在常见农作物病虫害防治上的研究状况及典型应用实例; 并就复配形式及其应用前景进行展望, 特别对农药联合复配未来如何迈向更高效、更安全、更绿色的发展道路以及在探索过程中潜在的技术瓶颈等问题进行探讨、提出应对策略, 同时也对农药复配在应用过程中所暴露的可能叠加危害生态环境和非靶标生物等问题表达关注; 旨在为推进农药创新利用提供最新参考资料和潜在启发思路。

关键词:化学农药; 生物农药; 农药联合复配; 农作物病虫害; 农产品质量安全

中图分类号:S481⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)04-0008-08

农作物生产过程受到多种因素制约, 而病虫害是公认的威胁农作物生产及农产品质量安全的最主要的风险因素。据世界粮农组织调查报告可知, 由于农作物病虫害的发生, 全球粮食每年减产 10% ~ 16%, 其中我国每年因此造成的粮食损失就高达

4 000 万 t^[1]。对病虫害有效防治是确保农作物稳产乃至提质增产的头等大事, 国际社会高度重视, 我国已于 2020 年 3 月正式颁布《农作物病虫害防治条例》, 明确将农作物病虫害防治提升到事关国家粮食安全和社会稳定的战略高度。

农药是应对农作物病虫害的最主要手段, 对助推农作物持续稳产乃至提质增产起到了极为关键的作用。然而长期对农药的依赖以及不规范使用甚至是滥用, 在世界范围内均已导致病虫害抗药性加剧发生^[2], 同时农药残留也给人类健康以及生态环境造成了极为不利的影响^[3]。对农药的合理使用是农作物病虫害持续有效防治研究的重点, 特别是探寻农药联合复配更是对现有农药创新利用和

收稿日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 31972292、31701724、31630061)。

作者简介: 徐重新(1987—), 男, 湖南新田人, 博士, 助理研究员, 研究方向为农产品质量安全防控技术。E-mail: hhyxcx@163.com。

通信作者: 刘媛, 博士, 研究员, 研究方向为农产品安全防控技术, E-mail: liuyuan@jaas.ac.cn; 刘贤金, 博士, 研究员, 研究方向为农产品安全防控技术, E-mail: jaasliu@jaas.ac.cn。

理化性质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(5): 895–902.

[61] 彭昌盛, 魏茜茜, 赵婷婷, 等. 太阳能热解技术制备生物炭的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(2): 61–67.

[62] Lin Y J, Hwang G S. Charcoal from biomass residues of a Cryptomeria plantation and analysis of its carbon fixation benefit in Taiwan[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(9): 1289–1294.

[63] Sparrevik M, Adam C, Martinsen V, et al. Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved “retort” kilns[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 72: 65–73.

[64] 丛宏斌, 赵立欣, 姚宗路, 等. 内加热连续式生物质炭化设备的研制[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1529–1535.

[65] 蒋恩臣, 苏旭林, 王明峰, 等. 生物质连续热解反应装置的变螺距螺旋输送机设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 121–124.

[66] 庄晓伟, 吴丽芳, 陈顺伟, 等. 机制棒自燃内热式炭化窑及其炭化工业试验[J]. 浙江林业科技, 2010, 30(4): 56–61.

[67] 刘玉升, 张大鹏. 基于白星花金龟幼虫转化玉米秸秆的微循环农牧场模式研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 85–87.

[68] 王倩. 利用白星花金龟和黄粉虫联合转化苹果园废弃物的技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 31–33.

发展的必然趋势。通过不同农药联合复配既可以实现对靶标病虫害联防联控,达到提升防治效率乃至延缓其抗药性发生频率的目的^[4],也能实现减少药用量从而降低农药在农产品和生态环境中的残留和蓄积,达到提升农产品质量安全水平和减少生态环境污染的目的^[5]。

农药联合复配的形式多种多样,从传统化学合成类农药复配^[6]到新型生物农药复配^[7]再到生物与化学农药复配^[8],相关研究紧随农药创新的步伐,发展极为迅猛。张江兆等报道,腐霉利与咯菌腈按 1:1 复配对黄瓜灰霉病菌丝的半最大效应浓度 (EC_{50}) 达到 0.016 mg/L,增效系数为 5.0^[9]。Yang 等报道,*Bt Cry* 与 *Bt Vip* 复配的生物农药组合药剂对黏虫的毒力增效系数高达 9.2^[10]。而高小宽等报道三七提取物与戊唑醇复配的生物-化学农药组合药剂对梨黑斑病病原菌的毒力增效系数也达到了 4.29^[11]。这些研究均具备极大的潜在应用价值和生态环境效益。特别是在新型安全的生物农药联合复配的创新运用上,得益于日益成熟的分子生物技术,使蛋白类生物农药(如 *Bt* 抗虫蛋白^[12]以及具备抗病虫害功能的凝集素^[13]、蜘蛛毒素^[14]、蝎毒素^[15]等)基因串联融合表达^[16]乃至构建联合增效的转基因抗病、抗虫作物^[17]成为可能,相关研究蓬勃发展。

本研究对近年来国内外有关农药复配在农作物病虫害防治上的最新研究进行系统梳理,并按化学-化学农药复配、生物-生物农药复配和生物-化学农药复配 3 种常规形式汇总归类,从中探寻农药复配经验规律及其应用前景、未来发展,特别是针对农药新的复配形式及实践中可能存在的问题进行探讨并提出相应对策,以期为推进农药创新应用提供全新的有价值的参考资料和潜在启发思路。

1 化学-化学农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究现状

化学农药是目前种类最多、使用最为广泛的农药类型,普遍具有瞬时药效快、可量产、成本低的特点,备受业界青睐。然而绝大多数化学农药对人类健康以及生态环境都存在或多或少的危害风险,我国最新修订版《食品安全国家标准食品中农药最大残留限量》(GB 2763—2021)所涵盖的 564 种农药在 376 种(类)食品中多达 10 092 项最大残留限量,

其中化学农药占据着绝对的主角,是监管的重中之重。正因为如此,探寻不同化学农药联合复配从而对现有化学农药进一步创新应用,一直以来都是农作物病虫害高效防治研究的重点,也是目前乃至今后相当一段时间内最行之有效的捷径。近年来,国内外有关化学-化学农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究很多,农药类型几乎都是当前使用较为频繁的高效低毒农药且均为二元复配形式,防治对象则涉及黄瓜灰霉病、番茄枯萎病、苹果落叶病、玉米大斑病、水稻纹枯病、花生网斑病以及沟金针虫、小地老虎、美洲大蠊和蛾类、蚜类、飞虱类、粉蚧类、螨类害虫等。按照对靶标病虫害的共毒系数(co-toxicity coefficient,简称 CTC)高于 120%^[6]或增效系数(synergistic coefficient,简称 SR)大于 1.5^[18]即认定复配农药具有联合增效作用的评判标准,张江兆等报道,腐霉利与咯菌腈按 1:1 复配对黄瓜灰霉病菌的增效系数为 5.0^[9]。金剑雪等报道,吡虫啉与异丙威按 7:400 复对白背飞虱的共毒系数达到 638.1^[19]。Narayanan 等报道了高效氯氟氰菊酯与胡椒基丁醚复配对花生红灯蛾的防治效果^[20]。Malathi 等报道了 5.25% 双苯氟脲·2.5% 茚虫威复配对棉铃虫、豆野螟和木豆黑潜蝇的防治效果^[21]。Kumar 等报道,5% 氟虫脲·20% 噻嗪酮复配对辣椒螨的防治等均展示出了显著的联防增效作用^[22]。这些制剂型复配形式的研究成果有望进一步推广应用。化学-化学农药联合复配在农作物病虫害防治上的最新代表性研究实例见表 1。

2 生物-生物农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究现状

生物农药作为源于自然界的生物活体或生物代谢产物,相对于化学农药而言,其普遍对人类健康更安全、对生态环境更友好,是农作物病虫害绿色防治领域研究的主要探寻对象,在农业生产上扮演着越来越重要的角色。近年来,国内外涉及生物-生物农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究非常活跃,农药类型涵盖具备生防功能的活体生物(如哈茨木霉、白僵菌、绿僵菌、苏云金芽孢杆菌、小卷蛾斯氏线虫)、动物毒素(如蜘蛛毒素、蝎毒素)、植物提取物或其代谢产物(如印楝素、苦参碱、除虫菊素、凝集素)、微生物代谢产物(如 *Bt* 抗虫蛋白、伊维菌素)、抗生素(农用抗生素归属尚无定论,

表 1 化学-化学农药联合复配在农作物病虫害防治上的最新代表性研究实例

复配成分	防治对象	施用效果	参考文献
腐霉利：咯菌腈	黄瓜灰霉病	二者按 1：1 复配对黄瓜灰霉病病菌菌丝的 EC ₅₀ 达到 0.016 mg/L, 增效系数为 5.0	[9]
丁香菌酯：戊唑醇	玉米大斑病	二者按 1：3 复配对玉米大斑病的毒力增效系数为 4.99, 田间用药对该病的防效可达 84.09%	[23]
烯丙苯噻唑：氟唑环菌胺	水稻稻瘟病、水稻纹枯病	16% 烯丙苯噻唑·氟唑环菌胺复配剂对温室水稻稻瘟病和纹枯病的防效分别为 64.79%、68.32%, 均比单剂防效高	[24]
咪鲜胺锰盐：多菌灵	平菇尖孢镰刀菌	二者按 1：1 复配对平菇尖孢镰刀菌的毒力增效系数为 2.904 9	[25]
甲氧虫酰肼：虱螨脲	甜菜夜蛾	二者按 4：6 复配对甜菜夜蛾幼虫的共毒系数达到 165.705	[26]
高效氯氟氰菊酯：胡椒基丁醚	花生红灯蛾	二者复配药剂对花生红灯蛾的致死率显著高于单剂, 表现为显著联防增效	[20]
双苯氟脲：茚虫威	棉铃虫、豆野螟、木豆黑潜蝇	5.25% 双苯氟脲·2.5% 茚虫威复配药剂对 3 种害虫具有强烈的毒杀活性, 表现为联防增效	[21]
溴氰菊酯：茚虫威	美洲大蠊	溴氰菊酯脂质纳米胶囊与茚虫威复配药剂对美洲大蠊致死率显著高于二者单独施药, 表现为联防增效	[27]
吡虫啉：高效氯氟氰菊酯	桃蚜	二者复配包埋的纳米脂质体对桃蚜防治效率显著增加, 表现为联防增效	[28]
吡虫啉：吡蚜酮	棉蚜	二者按 1：1 复配对棉蚜的毒力增效系数为 3.85	[29]
苯甲酸甲酯：苯甲酸乙酯	棉蚜	二者按 1：1 复配对棉蚜幼虫的共毒系数为 144.42	[30]
吡虫啉：异丙威	白背飞虱	二者按 7：400 复配对白背飞虱的共毒系数达到 638.1	[19]
溴氰菊酯：茚虫威	扶桑绵粉蚧	二者按 1：10 复配对扶桑绵粉蚧的致死率表现为显著联防增效	[31]
丙溴磷：氯氟菊酯	扶桑绵粉蚧	二者复配药剂对扶桑绵粉蚧表现为显著联防增效	[32]
联苯肼酯：克螨特	二斑叶螨	二者按 5：1 复配对二斑叶螨的共毒系数为 137.5	[33]
氟虫腈：噻嗪酮	辣椒螨	5% 氟虫腈·20% 噻嗪酮联合复配用药对辣椒螨的致死率表现为联防增效	[22]
甲氧菊酯：丁氟螨酯	朱砂叶螨	8% 甲氧菊酯·丁氟螨酯纳米乳剂对朱砂叶螨的致死率表现为联防增效	[34]

本研究将其纳入生物农药)等,防治对象涉及花椒根腐病、葡萄灰霉病、茶树轮斑病以及黏虫、根虫、米象、蓟马、甲虫、棉铃虫和蛾类、蚜类、粉虱类、螟类、螨类害虫等。其中 Ali 等将球孢白僵菌培养物与桉树提取物复配对小麦蚜虫具有联防增效作用,最高致死率达到 87%^[35]。Wang 等将 *Bt* 杀虫蛋白 Cry9Aa 和 Vip3Aa 按 1：1 复配药剂对二化螟和玉米螟的毒力增效系数分别为 10.6 和 4.5^[36]。这些制剂型复配形式的研究均展示出了良好的应用价值。Din 等将 *Bt* Vip3Aa 和大蒜凝集素抗虫蛋白基因串联复配构建转基因棉花对棉铃虫和粉虱均具有联防增效作用,致死率分别达到 100% 和 95%^[37]。Javaid 等将洋葱凝集素与蜘蛛神经毒素进行串联复配构建转基因烟草,对棉花粉蚧、桃蚜和烟粉虱都具有联防增效作用,致死率均达到 100%^[38]。这些有别于制剂型农药复配的创新研究充分利用了蛋白类生物农药的蛋白质属性,借助分子生物技术直接将不同抗虫蛋白在基因水平上进行串联,构建具有联防增效作用的转基因抗虫作

物,将生物-生物农药联合复配推向了新的高度,相关最新代表性研究实例见表 2。

3 生物-化学农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究现状

化学农药高效但危害风险大,生物农药绿色安全但药效温和,探寻生物农药与化学农药复配是当前农作物病虫害防治过程中短期内既无法彻底摆脱化学农药依赖又无法全部依靠生物农药的情况下有望兼二者农药优势的最佳选择,在实际应用过程中往往能达到出其不意的效果。目前,复配类型涵盖生防活体菌与化学农药复配、植物提取物与化学农药复配、农用抗生素与化学农药复配以及转基因抗虫作物与化学农药组配等形式,防治对象涉及农作物青枯病、灰霉病、黑斑病、赤星病、枝枯病、桃流胶病以及赤拟谷盗、蝗虫、蓟马、小地老虎、象鼻虫和粉虱类、蛾类、螨类害虫等。陈长卿等将芽孢杆菌 NJ13 与噻菌环胺复配,对人参黑斑病的共毒系数高达 6 751.4^[8]。高小宽等将三七提取物与戊

表 2 生物-生物农药联合复配在农作物病虫害防治上的最新代表性研究实例

复配成分	防治对象	施用效果	参考文献
异丁香酚：丁香酚	匍枝根霉、蓝色犁头霉	二者按 1：1 复配对匍枝根霉菌和蓝色犁头霉菌的毒力增效系数分别为 1.14、1.73	[39]
多杀菌素：哈茨木霉	米象	0.5 mg/kg 多杀菌素·2.10×10 ⁷ CFU/kg 哈茨木霉孢子复配药剂对米象成虫致死率达到 100%，表现为联防增效	[40]
布氏白僵菌：苦参碱	斜纹夜蛾	二者复配对斜纹夜蛾幼虫最高致死率达到 89.25%，表现为联防增效	[41]
菖蒲提取物：假茛菪提取物	斜纹夜蛾	二者按 1：1 复配对斜纹夜蛾幼虫致死率最高达 82.43%，表现为联防增效	[42]
刺束梗孢属真菌：苦参碱	蓟马	1×10 ⁸ CFU/mL 刺束梗孢属真菌孢子·苦参碱 0.25 mg/mL 复配药剂对蓟马具有联防增效抗性	[43]
肉座子囊镰刀菌：烟草植物提取物	仙人掌胭脂虫	二者复配施药对仙人掌胭脂虫最高致死率可达 98.7%，表现为联防增效	[44]
小卷蛾斯氏线虫：阿维菌素	马铃薯块茎蛾	二者联合应用对马铃薯块茎蛾蛹前幼虫具有联合增效致死活性	[45]
阿维菌素：甲氨基阿维菌素	谷斑皮蠹	二者按 3：1 复配对谷斑皮蠹幼虫的毒力增效系数为 3.37	[46]
绿僵菌：除虫菊提取物	蚕豆蚜虫	二者复配药剂能显著提高对蚕豆蚜虫的致死率，表现为联防增效	[47]
挥发性镰刀菌：蓖麻提取物	柑橘黑粉虱	挥发性镰刀菌与 5% 蓖麻提取物复配对柑橘黑粉虱的最高防治率可达 98.2%，表现为联防增效	[48]
球孢白僵菌：牛角瓜植物提取物	烟粉虱	球孢白僵菌与牛角瓜植物提取物复配应用对烟粉虱的致死率均显著提升，表现为联防增效	[7]
球孢白僵菌：桉树提取物	小麦蚜虫	二者混合药剂对小麦蚜虫的最高致死率达到 87%，高于二者单独施用，表现为联防增效	[35]
球孢白僵菌：苏云金芽孢杆菌	甘蓝银纹夜蛾	二者发酵液(孢子浓度均为 10 ⁷ CFU/mL)按 0.5：0.5 复配对甘蓝银纹夜蛾幼虫致死率为 83.97%，表现为联防增效	[49]
苏云金芽孢杆菌晶体：印楝素	苹果小卷蛾、甜菜夜蛾	二者复配药剂对 3 种害虫具有良好的防治效果，表现为联防增效	[50]
苏云金芽孢杆菌孢子：Bt Cry3A	马铃薯甲虫	二者联合复配对马铃薯甲虫的致死率表现为联防增效	[51]
Cry1Ab：Vip3Aa	草地贪夜蛾	二者按 1：1 复配药剂对草地贪夜蛾幼虫的毒力增效系数为 2.84	[52]
Cry9Aa：Vip3Aa	二化螟、玉米螟	二者按 1：1 复配药剂对二化螟和玉米螟的毒力增效系数分别为 10.6、4.5	[36]
Bt Cry：Bt Vip	黏虫	2 种类型抗虫蛋白联合复配用药对黏虫的最大毒力增效系数为 9.2	[10]
Bt Cry1Ac：Bt Cry1F	黏虫	2 组串联了 2 种 Bt 抗虫蛋白的转基因棉对黏虫的杀虫活性明显高于它们单独转基因，表现为增效	[53]
Bt Cry1Ac：Bt Cry2Ab	斜纹夜蛾	2 种抗虫蛋白串联融合转基因棉对斜纹夜蛾致死率达到 93%，表现为联防增效	[54]
Bt Cry64Ba：Bt Cry64Ca	灰飞虱、白背飞虱	2 种抗虫蛋白串联在工程菌中融合表达的复合物对 2 种害虫均有较高的杀虫活性，表现为联防增效	[16]
Bt Cry1Ac：Bt Vip3A	斜纹夜蛾、甜菜夜蛾、小地老虎	2 种抗虫蛋白串联融合转基因棉对 3 种害虫的致死率明显高于它们单独转基因，表现为联防增效	[17]
Bt Cry1AcF：Bt Cry2Aa	棉铃虫	2 种抗虫蛋白串联融合转基因烟草对棉铃虫的致死率高于它们单独转基因，表现为联防增效	[55]
Bt Cry1Ac：Bt Cry1F：Bt Vip3Aa19		3 组串联了 3 种 Bt 抗虫蛋白转基因棉对棉铃虫致死率均达到 100%，比这几种抗虫蛋白单独转基因棉的抗虫活性强，表现为联防增效	[56]
Cry3Bb1：蜘蛛毒素 Hv1a	玉米根虫	Cry3Bb1 (170.8 μg/cm ²)·蜘蛛毒素 Hv1a (0.6 mg/cm ²) 复配药剂对玉米根虫的校正致死率为 64%，表现为联防增效	[57]
Cry2Ab：阿维菌素	小菜蛾	二者偶联复合物对小菜蛾的抗虫活性具有显著提升作用，表现为联防增效	[58]
Bt Cry1Ac：雪花莲凝集素	棉贪夜蛾、棉蚜	二者串联融合蛋白转基因棉对 2 种害虫的致死率显著提升，表现为联防增效	[59]
Bt Vip3Aa：大蒜凝集素	棉铃虫、粉虱	二者串联融合蛋白转基因棉对棉铃虫致死率达 100%、对粉虱致死率达到 95%，表现为联防增效	[37]
Bt Cry1Ac：大蒜凝集素	黄茎螟、折叶螟、褐飞虱	二者融合蛋白转基因水稻对供试害虫具有明显致死作用，表现为联防增效	[60]
洋葱凝集素：蜘蛛神经毒素	棉花粉蚧、桃蚜、烟粉虱	二者融合蛋白转基因烟草对供试害虫的致死率达到 100%，表现为联防增效	[38]
扁豆凝集素：鹰嘴豆蛋白酶抑制剂	芥菜蚜虫	二者串联融合蛋白的转基因芥菜对蚜虫的抗性显著提升，表现为联防增效	[61]

唑醇按 2 : 1 复配对梨黑斑病病原菌的毒力增效系数为 4. 29^[11]。Jia 等将绿僵菌与氯虫苯甲酰胺复配对蝗虫的共毒系数达到 1 646^[62]。Burtet 等将 *Bt* 转基因玉米分别与溴虫腈、杀虫隆、灭多威、氟虫酰胺等化学农药配合使用,发现均能有效提高对草地贪

夜蛾的防治效率,表现为较强的联防增效作用^[63]。这些生物 - 化学农药复配的最新研究成果对相关农作物病虫害有效防治的同时,也对提升农产品质量安全水平具有极其重要的意义,相关最新代表性研究实例见表 3。

表 3 生物 - 化学农药联合复配在农作物病虫害防治上的最新代表性研究实例

复配成分	防治对象	施用效果	参考文献
芽孢杆菌 NJ13 : 啞菌环胺	人参黑斑病	二者按 2 : 3 复配对人参黑斑病病原菌的共毒系数为 6 751. 4	[8]
三七提取物 : 戊唑醇	梨黑斑病	二者按 2 : 1 复配对梨黑斑病病原菌的毒力增效系数为 4. 29	[11]
爪哇棒束孢真菌 : 甲螨酯	烟粉虱	二者复配药剂对烟粉虱幼虫的致死率提高了 24% , 表现为联防增效	[64]
球孢白僵菌 : 氟啶虫酰胺	烟粉虱	二者复配药剂对烟粉虱幼虫和成虫的致死率显著提升, 表现为联防增效	[65]
烟草精油 : 磷化氢	赤拟谷盗	15% 烟草精油 · 500 μL/L 磷化氢混合药剂对赤拟谷盗的熏杀率达到 90% 以上, 表现为联防增效	[66]
绿僵菌 : 氯虫苯甲酰胺	蝗虫	二者联合复配施药对蝗虫的共毒系数为 1 646	[62]
球孢白僵菌 : 乐果	蓟马	二者复配用药对蓟马致死率达到 73. 33% , 表现为联防增效	[67]
球孢白僵菌 : 拟除虫菊酯	象鼻虫	二者复配对可协同提高对拟除虫菊酯敏感以及耐药象鼻虫成虫的死亡率, 表现为联合增效作用	[68]
阿维菌素 : 氯虫苯甲酰胺	小菜蛾	50% 阿维菌素 · 7. 5% 氯虫苯甲酰胺复配微胶囊对小菜蛾具有显著杀虫活性, 表现为联防增效	[69]
乙基多杀菌素 : 氯虫苯甲酰胺	小地老虎	二者按 5 : 3 复配对小地老虎的共毒系数为 201. 90	[6]
<i>Bt</i> 抗虫蛋白 : 溴虫腈、杀虫隆、灭多威、氟虫酰胺	草地贪夜蛾	<i>Bt</i> 转基因玉米协同杀虫剂能有效提高对草地贪夜蛾的防治效率, 表现为联防增效	[63]

4 结语与展望

农药联合复配创新及应用在农作物病虫害防治上的重要性几乎可与农药本身的创新研发相比肩;而复配形式上,在农药没有质的突破之前,短时间内很难跨越化学 - 化学农药复配、生物 - 生物农药复配和生物 - 化学农药复配这 3 种传统模式,它们在农作物病虫害防治和生态环境效益上各有所长,也都存在或多或少的局限性。

化学 - 化学农药复配是建立在高效的化学农药基础上的更优化组配,是应对农作物病虫害的“速效剂”,但化学农药对人类健康以及生态环境造成的直接或间接安全风险严重束缚了其应用潜力,这与全世界越来越倡导农作物病虫害绿色防治的总基调渐行渐远。近年来生物源性的仿生化学合成农药^[70-71]因兼具化学农药高效、可量产的特性和生物农药的安全性而日益受到关注,或许能在一定程度上避免传统化学农药及其复配药剂在应用过程中面临的困境,有望为化学农药及其复配的创新研发与应用开辟一条新的出路。

生物 - 生物农药是农作物病虫害绿色防治发

展的必然需求,特别是在复配中引入具备生防功能的生物活体^[45]或将蛋白类生物农药基因直接导入生防活体^[72]乃至相应农作物^[59]中联合并用,在提升对病虫害瞬时防治效率的同时也能对病虫害发挥持久性联防联控的功效,这种策略为生物农药联合复配的创新应用拓宽了思路,正成为多学科交叉竞先探索的热点。

生物 - 化学农药复配是当前农作物病虫害防治中既不可能完全依赖生物农药又无法彻底摆脱化学农药的状况下的最佳选择,兼具了化学农药的瞬时速效性和生物农药的持久性优势,甚至有些组合复配对靶标病虫害的毒力增效系数高达几十倍^[73]或共毒系数高达上千数量级^[8,62],增效作用十分显著,应用潜力巨大。特别是整合了生物农药基因的抗病虫害农作物搭配化学农药对靶标病虫害的联防联控^[63],不仅可以对靶标害虫产生持久性防治效果,同时也能缓解对化学农药的依赖从而达到减药用量的目的,是目前世界范围内较为成功的病虫害防治新模式,值得推广示范。

农药联合复配尽管具备极大的应用潜力和生态环境效益,但不容忽视的是近几年也有一些证据

表明,其可能对生态系统的稳定和安全存在较大的风险隐患,特别是对环境中非靶标生物(如蜜蜂^[74]、蚯蚓^[75]、水生生物^[76])可能会造成更为不利的影响,从这个角度来看,农药联合复配成了一柄双刃剑,因此需要综合评估才能慎重使用。但总的来说,农药联合复配在农作物病虫害防治上的应用对人类的生存和发展仍然是利大于弊。

参考文献:

- [1] Gao D M, Sun Q, Hu B, et al. A framework for agricultural pest and disease monitoring based on internet - of - things and unmanned aerial vehicles[J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1487.
- [2] Gould F, Brown Z S, Kuzma J. Wicked evolution: can we address the sociobiological dilemma of pesticide resistance? [J]. *Science*, 2018, 360(6390): 728 - 732.
- [3] Sharma A, Shukla A, Attri K, et al. Global trends in pesticides: a looming threat and viable alternatives [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 201: 110812.
- [4] Hernández A F, Gil F, Lacasaña M. Toxicological interactions of pesticide mixtures: an update[J]. *Archives of Toxicology*, 2017, 91(10): 3211 - 3223.
- [5] 葛 静, 王冬兰, 吴福民, 等. 江苏溧阳水稻田减量用药研究初探[J]. *农药学报*, 2019, 21(1): 66 - 74.
- [6] 何发林, 姜兴印, 姚晨涛, 等. 氯虫苯甲酰胺与 6 种药剂复配对小地老虎的联合毒力[J]. *植物保护*, 2018, 44(6): 236 - 241.
- [7] Jaber L R, Araj S E, Qasem J R. Compatibility of endophytic fungal entomopathogens with plant extracts for the management of sweetpotato whitefly *Bemisia tabaci* Gennadius (Homoptera: Aleyrodidae)[J]. *Biological Control*, 2018, 117: 164 - 171.
- [8] 陈长卿, 金 辉, 姜 云, 等. 生防菌株 NJ13 与化学农药复配对人参黑斑病的联合毒力及田间防效[J]. *农药*, 2019, 58(5): 381 - 384.
- [9] 张江兆, 徐重新, 沈 燕, 等. 腐霉利和咯菌腈混用对黄瓜灰霉病菌的联合毒力及药剂残留动态[J]. *农药学报*, 2022, 24(4): 851 - 858.
- [10] Yang J, Quan Y D, Sivaprasath P, et al. Insecticidal activity and synergistic combinations of ten different *Bt* toxins against *Mythimna separata* (Walker)[J]. *Toxins*, 2018, 10(11): 454.
- [11] 高小宽, 马 光, 吕亚慈, 等. 不同农药对梨黑斑病的毒力测定及与三七提取物复配的研究[J]. *北方园艺*, 2020(5): 51 - 55.
- [12] Bel Y, Ferré J, Hernández - Martínez P. *Bacillus thuringiensis* toxins: functional characterization and mechanism of action [J]. *Toxins*, 2020, 12(12): 785.
- [13] Vanti G L, Vishwanathreddy H, Venkat H, et al. *Sclerotium rolfsii* lectin expressed in tobacco confers protection against *Spodoptera litura* and *Myzus persicae* [J]. *Journal of Pest Science*, 2016, 89(2): 591 - 602.
- [14] Wang X C, Tang X C, Xu D H, et al. Molecular basis and mechanism underlying the insecticidal activity of venoms and toxins from *Latrodectus* spiders[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(2): 318 - 323.
- [15] Li H B, Xia Y X. Recombinant production of the insecticidal scorpion toxin BjaIT in *Escherichia coli* [J]. *Protein Expression and Purification*, 2018, 142: 62 - 67.
- [16] Liu Y L, Wang Y L, Shu C L, et al. Cry64Ba and Cry64Ca, two ETX/MTX2 - type *Bacillus thuringiensis* insecticidal proteins active against hemipteran pests[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2018, 84(3): e01996 - e01917.
- [17] Chen W B, Lu G Q, Cheng H M, et al. Transgenic cotton coexpressing Vip3A and Cry1Ac has a broad insecticidal spectrum against lepidopteran pests [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2017, 149: 59 - 65.
- [18] 陈珺君, 刘 芳, 廖先清, 等. 两种蜘蛛毒素肽与苏云金芽胞杆菌 Cry1Ac 蛋白的融合表达及杀虫活性[J]. *中国生物防治学报*, 2018, 34(6): 838 - 847.
- [19] 金剑雪, 金道超, 李文红, 等. 防治白背飞虱的农药复配增效配方筛选[J]. *植物保护*, 2017, 43(1): 199 - 204.
- [20] Narayanan M, Ranganathan M, Subramanian S M, et al. Toxicity of cypermethrin and enzyme inhibitor synergists in red hairy caterpillar *Amsacta albistriga* (Lepidoptera: Arctiidae) [J]. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 2020, 81(1): 45.
- [21] Malathi S, Kumar B D. Evaluation of ready mix insecticide novaluron 5.25% + indoxacarb 4.5% SC against pod borer complex in pigeonpea[J]. *Andhra Agriculture Journal*, 2017, 64(4): 841 - 851.
- [22] Kumar D, Raju S V S, Sharma K R. Population dynamics of chilli mite and their management with certain newer insecticide combination formulations[J]. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2019, 8(2): 403 - 407.
- [23] 潘文轩, 王 索, 张思胜, 等. 防治玉米大斑病的药剂筛选及田间应用[J]. *农药*, 2021, 60(5): 375 - 378.
- [24] 王国祯, 李雪明, 韩瑞旗, 等. 烯丙苯唑啉和氟唑环菌胺复配颗粒剂研究及其对水稻苗期稻瘟病和纹枯病的防效[J]. *农药学报*, 2020, 22(2): 362 - 369.
- [25] 张朝辉, 张 广, 闫 鹏, 等. 复配杀菌剂防治平菇尖孢镰刀菌病害的效果测定[J]. *核农学报*, 2021, 35(10): 2311 - 2318.
- [26] Chen J X, Jiang W L, Hu H Y, et al. Joint toxicity of methoxyfenozide and lufenuron on larvae of *Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Asia - Pacific Entomology*, 2019, 22(3): 795 - 801.
- [27] Caballero J P, Murillo L, List O, et al. Nanoencapsulated deltamethrin as synergistic agent potentiates insecticide effect of indoxacarb through an unusual neuronal calcium - dependent mechanism[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2019, 157: 1 - 12.
- [28] Moradi F G, Hejazi M J, Hamishehkar H, et al. Co - encapsulation of imidacloprid and lambda - cyhalothrin using biocompatible nanocarriers: characterization and application[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 175: 155 - 163.
- [29] Somar R O, Zamani A A, Alizadeh M. Joint action toxicity of imidacloprid and pymetrozine on the melon aphid, *Aphis gossypii*

- [J]. Crop Protection, 2019, 124: 104850.
- [30] Mostafiz M M, Hassan E, Shim J K, et al. Insecticidal efficacy of three benzoate derivatives against *Aphis gossypii* and its predator *Chrysoperla carnea* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 184: 109653.
- [31] Saddiq B, Ejaz M, Shad S A, et al. Assessing the combined toxicity of conventional and newer insecticides on the cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* [J]. Ecotoxicology, 2017, 26 (9): 1240 – 1249.
- [32] Ansari H, Haseeb M. Efficacy of combination insecticide and biopesticide against *Phenacoccus solenopsis* in laboratory condition on okra [J]. Journal of Entomology and Zoology studies, 2019, 7 (5): 1185 – 1189.
- [33] Liang X, Chen Q, Wu C L, et al. The joint toxicity of bifentazate and propargite mixture against *Tetranychus urticae* Koch [J]. International Journal of Acarology, 2018, 44 (1): 35 – 40.
- [34] 赵恒科, 蓝月, 南灿, 等. 8% 甲氰菊酯·丁氟螨酯纳米乳剂的研制及其性能 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (14): 2700 – 2710.
- [35] Ali S, Farooqi M A, Sajjad A, et al. Compatibility of entomopathogenic fungi and botanical extracts against the wheat aphid, *Sitobion avenae* (Fab.) (Hemiptera: Aphididae) [J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2018, 28 (1): 97.
- [36] Wang Z Y, Fang L F, Zhou Z S, et al. Specific binding between *Bacillus thuringiensis* Cry9Aa and Vip3Aa toxins synergizes their toxicity against Asiatic rice borer (*Chilo suppressalis*) [J]. The Journal of Biological Chemistry, 2018, 293 (29): 11447 – 11458.
- [37] Din S U, Azam S, Rao A Q, et al. Development of broad-spectrum and sustainable resistance in cotton against major insects through the combination of *Bt* and plant lectin genes [J]. Plant Cell Reports, 2021, 40 (4): 707 – 721.
- [38] Javaid S, Amin I, Jander G, et al. A transgenic approach to control hemipteran insects by expressing insecticidal genes under phloem-specific promoters [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 34706.
- [39] Zhou L J, Zhang Z L, Wei M, et al. Evaluation of the antifungal activity of individual and combined monoterpenes against *Rhizopus stolonifer* and *Absidia coerulea* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26 (8): 7804 – 7809.
- [40] Gad H A, Al-Anany M S, Abdelgaleil S A M. Enhancement the efficacy of spinosad for the control *Sitophilus oryzae* by combined application with diatomaceous earth and *Trichoderma harzianum* [J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 88: 101663.
- [41] Wu J H, Yu X T, Wang X S, et al. Matrine enhances the pathogenicity of *Beauveria brongniartii* against *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1812.
- [42] Yooboon T, Pengsook A, Ratwatthananon A, et al. A plant-based extract mixture for controlling *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2019, 6 (1): 1 – 10.
- [43] Wu J H, Yang B, Zhang X C, et al. Synergistic interaction between the entomopathogenic fungus *Akanthomyces attenuatus* (Zare & Gams) and the botanical insecticide matrine against *Megalurothrips usitatus* (Bagrall) [J]. Journal of Fungi, 2021, 7 (7): 536.
- [44] Diniz A G, Barbosa L F S, Santos A C D S, et al. Bio-insecticide effect of isolates of *Fusarium caatingaense* (Sordariomycetes: Hypocreales) combined to botanical extracts against *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) [J]. Biocontrol Science and Technology, 2020, 30 (4): 384 – 395.
- [45] Kary N E, Sanatipour Z, Mohammadi D, et al. Developmental stage affects the interaction of *Steinernema carpocapsae* and abamectin for the control of *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera, Gelechiidae) [J]. Biological Control, 2018, 122: 18 – 23.
- [46] Tanzeela R, Rauf S F, Hareem M, et al. Efficacy of mixture of pesticides on the mortality and energy reserves of a stored grain pest *Trogoderma granarium* evets [J]. Pakistan Journal of Zoology, 2019, 51 (6): 2297 – 2309.
- [47] Fernández-Grandón G M, Harte S J, Ewany J, et al. Additive effect of botanical insecticide and entomopathogenic fungi on pest mortality and the behavioral response of its natural enemy [J]. Plants, 2020, 9 (2): 173.
- [48] Silva B L F, da Silva S A C, Diniz A G, et al. Entomopathogenicity of fungi in combination with *Ricinus communis* extract for the control of *Aleurocanthus woglumi* [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2021, 169 (9): 838 – 847.
- [49] Sayed A M M, Behle R W. Evaluating a dual microbial agent biopesticide with *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* and *Beauveria bassiana* blastospores [J]. Biocontrol Science and Technology, 2017, 27 (4): 461 – 474.
- [50] Konecka E, Kaznowski A, Tomkowiak D. Insecticidal activity of mixtures of *Bacillus thuringiensis* crystals with plant oils of *Sinapis alba* and *Azadirachta indica* [J]. Annals of Applied Biology, 2019, 174 (3): 364 – 371.
- [51] Dubovskiy I M, Grizanov E V, Tereshchenko D, et al. *Bacillus thuringiensis* spores and Cry3A toxins act synergistically to expedite Colorado potato beetle mortality [J]. Toxins, 2021, 13 (11): 746.
- [52] Figueiredo C S, Lemes A R N, Sebastião I, et al. Synergism of the *Bacillus thuringiensis* Cry1, Cry2, and Vip3 proteins in *Spodoptera frugiperda* control [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2019, 188 (3): 798 – 809.
- [53] Rabelo M M, Matos J M L, Orozco-Restrepo S M, et al. Like parents, like offspring? Susceptibility to *Bt* toxins, development on dual-gene *Bt* cotton, and parental effect of Cry1Ac on a nontarget lepidopteran pest [J]. Journal of Economic Entomology, 2020, 113 (3): 1234 – 1242.
- [54] Siddiqui H A, Asif M, Asad S, et al. Development and evaluation of double gene transgenic cotton lines expressing Cry toxins for protection against chewing insect pests [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 11774.
- [55] Muralimohan N, Saini R P, Kesiraju K, et al. Molecular stacking of two codon-modified genes encoding *Bt* insecticidal proteins, Cry1AcF and Cry2Aa for management of resistance development in

- Helicoverpa armigera* [J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2020, 29(3): 518–527.
- [56] Rabelo M M, Paula – Moraes S V, Pereira E J G, et al. Demographic performance of *Helicoverpa zea* populations on dual and triple – gene bt cotton[J]. Toxins, 2020, 12(9): 551.
- [57] Pereira A E, Huynh M P, Carlson A R, et al. Assessing the single and combined toxicity of the bioinsecticide spear and Cry3Bb1 protein against susceptible and resistant western corn rootworm larvae (Coleoptera: Chrysomelidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2021, 114(5): 2220–2228.
- [58] Pan Z Z, Xu L, Zheng Y S, et al. Synthesis and characterization of Cry2Ab – AVM bioconjugate; enhanced affinity to binding proteins and insecticidal activity[J]. Toxins, 2019, 11(9): 497.
- [59] Khabbazi S D, Khabbazi A D, Fatih Özcan S, et al. Expression of GNA and biting site – restricted *cry1Ac* in cotton; an efficient attribution to insect pest management strategies [J]. Plant Biotechnology Reports, 2018, 12(4): 273–282.
- [60] Boddupally D, Tamirisa S, Gundra S R, et al. Expression of hybrid fusion protein (Cry1Ac; ASAL) in transgenic rice plants imparts resistance against multiple insect pests [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 8458.
- [61] Rani S, Sharma V, Hada A, et al. Fusion gene construct preparation with lectin and protease inhibitor genes against aphids and efficient genetic transformation of *Brassica juncea* using cotyledons explants [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(5): 115.
- [62] Jia M, Cao G C, Li Y B, et al. Biochemical basis of synergism between pathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* and insecticide chlorantraniliprole in *Locusta migratoria* (Meyen) [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28424.
- [63] Burtet L M, Bernardi O, Melo A A, et al. Managing fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), with *Bt* maize and insecticides in southern Brazil [J]. Pest Management Science, 2017, 73(12): 2569–2577.
- [64] Santos T, Quintela E, Moura M G, et al. Enhanced mortality of *Bemisia tabaci* nymphs by *Isaria javanica* combined with sublethal doses of chemical insecticides[J]. Journal of Applied Entomology, 2018, 142(1): 598–609.
- [65] Wari D, Okada R, Takagi M, et al. Augmentation and compatibility of *Beauveria bassiana* with pesticides against different growth stages of *Bemisia tabaci* (Gennadius); an *in vitro* and field approach[J]. Pest Management Science, 2020, 76(9): 3236–3252.
- [66] Khaliq A, Ullah M I, Afzal M, et al. Management of *Tribolium castaneum* using synergism between conventional fumigant and plant essential oils[J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2020, 40(4): 781–788.
- [67] Kachot A V, Jethva D M, Patel D S. Bio – efficacy of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin against onion thrips, *Thrips tabaci* Lindeman [J]. The Pharma Innovation Journal, 2021, 10(9): 1456–1459.
- [68] Wu S H, Kostromyska O S, Koppenhöfer A M. Synergistic combinations of a pyrethroid insecticide and an emulsifiable oil formulation of *Beauveria bassiana* to overcome insecticide resistance in *Listronotus maculicollis* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2017, 110(4): 1794–1802.
- [69] Suraphan N, Fan L F, Liu B X, et al. Co – delivery of chlorantraniliprole and avermectin with a polylactide microcapsule formulation[J]. RSC Advances, 2020, 10(43): 25418–25425.
- [70] Xiang L B, Xue M F, Yang L J, et al. Bionic fungicide physcion controls gray mold in tomato; possible modes of action[J]. Journal of General Plant Pathology, 2019, 85(1): 57–65.
- [71] Qin H, Zhou X T, Gu D F, et al. Preparation and characterization of a novel waterborne lambda – cyhalothrin/alkyd nanoemulsion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(38): 10587–10594.
- [72] Deng S Q, Zou W H, Li D L, et al. Expression of *Bacillus thuringiensis* toxin Cyt2Ba in the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* increases its virulence towards *Aedes mosquitoes* [J]. PLoS Neglected Tropical Diseases, 2019, 13(7): e0007590.
- [73] 高汝佳, 尤春梅, 黄沈鑫, 等. 不同生物农药及与化学农药复配对桃流胶病菌的毒力[J]. 农药, 2016, 55(7): 536–538.
- [74] Wang Y, Zhu Y C, Li W. Interaction patterns and combined toxic effects of acetamiprid in combination with seven pesticides on honey bee (*Apis mellifera* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 190: 110100.
- [75] Tiwari R K, Singh S, Pandey R S. Assessment of acute toxicity and biochemical responses to chlorpyrifos, cypermethrin and their combination exposed earthworm, *Eudrilus eugeniae* [J]. Toxicology Reports, 2019, 6: 288–297.
- [76] Qiu W, Liu X, Yang F, et al. Single and joint toxic effects of four antibiotics on some metabolic pathways of zebrafish (*Danio rerio*) larvae[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716: 137062.